

На правах рукописи

Симон Евгения Игоревна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ
ПРИ ЗОНДИРОВАНИЯХ ТРЕХМЕРНОЙ СРЕДЫ НЕСТАЦИОНАРНЫМ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Персова Марина Геннадьевна

Официальные оппоненты: Могилатов Владимир Сергеевич, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, главный научный сотрудник

Давыденко Юрий Александрович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Иркутский государственный технический университет», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН

Защита состоится «05» июня 2014 г. в 17⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.06 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/static_files/29781/NSTU_dis_Simon.pdf.

Автореферат разослан «__» _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Чубич Владимир Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Необходимость применения трехмерных подходов для построения геолого-геофизических моделей Земли по данным электромагнитных зондирований и повышения разрешающей способности различных технологий электромагнитных зондирований и их результативности уже давно не вызывает сомнений, и особенно это касается тех типов работ, где получение экспериментальных данных сопряжено с большими финансовыми и трудовыми затратами.

Использование трехмерных подходов при интерпретации электроразведочных данных позволяет существенно повысить качество восстановления характеристик поисковых объектов. Такие подходы разрабатываются в трудах многих зарубежных и отечественных ученых – L.H. Cox, R. Ellis, G.A. Newman, R.L. Mackie, F.A. Мааø, D.W. Oldenburg, A. Raiche, Z. Xiong, V. Druskin, М.Н. Бердичевского, М.С. Жданова, М.Г. Персовой, Э.Б. Файнберга и др. Одна из главных проблем интерпретации практических данных – появление ложных аномалий и пропуск реальных, что довольно часто случается при использовании упрощенных методов интерпретации из-за неучета или недостаточно правильного учета неоднородностей верхней части разреза, перекрывающих поисковые объекты. Огромная трудоемкость 3D-интерпретаций, основанных на точном 3D-моделировании электромагнитного поля, является одним из главных препятствий развития высокоразрешающих технологий электроразведки. Особенно актуально это для технологий электроразведки, основанных на возбуждении и измерении нестационарного электромагнитного поля.

В настоящее время существуют версии программного обеспечения (ПО), реализующего прямое 3D-моделирование геоэлектромагнитных полей. Некоторые из них уже применялись при интерпретации практических данных в сложной геоэлектрической обстановке, например, в рамках нефтепоисковых исследований и поиска рудных месторождений на площадях Восточной Сибири и Дальнего Востока (Юрубчено-Тохомское нефтегазовое месторождение, Карамкенский руд-

ный узел и др.). Однако эти инверсии выполнялись «вручную», при построении трехмерных моделей среды по некоторым площадям операторам требовалось решать до нескольких тысяч трехмерных задач. Безусловно, эта работа очень трудоемкая и требует высокой квалификации операторов. Поэтому разработка алгоритмов автоматических 3D-инверсий является актуальной проблемой, которая в настоящее время довольно широко обсуждается во многих, в основном, зарубежных научных публикациях.

Стандартным подходом при реализации алгоритмов 3D-инверсии данных электромагнитных зондирований является разбиение изучаемого объема среды на ячейки и поиск коэффициента удельной электрической проводимости в каждой из ячеек (M.S. Zhdanov, R.L. Mackie, W. Siripunvaraporn, C.G. Farquharson, D.W. Oldenburg и др.). Очевидно, что главным препятствием развития и внедрения этих алгоритмов в практику электроразведочных исследований является их вычислительная трудоемкость и поэтому чаще всего при их реализации используют упрощенные математические модели, что может негативно влиять как на сходимость, так и на результаты инверсии.

Кроме того, повышения качества результатов 3D-инверсии, как правило, пытаются добиться путем использования более мелких разбиений, что довольно часто помимо резкого роста вычислительных затрат приводит к нахождению одного из «эквивалентных» решений с довольно «пестрой» картиной распределения удельного сопротивления, что не только не облегчает, а наоборот, затрудняет определение морфологии и удельного сопротивления целевого объекта.

Решением данной проблемы может быть, например, использование многоэтапных процедур, в которых после первого этапа, где с помощью ячеистой структуры ищется стартовое распределение параметров, выполняется второй этап, на котором уточняются параметры локальных неоднородностей, сформированных по результатам инверсии в ячеистой структуре с достаточно крупными ячейками. Кроме того, на первых этапах могут использоваться различные варианты быстрых инверсий для получения стартовых геоэлектрических моделей, уточнение кото-

рых на последующих этапах будет осуществляться на основе нелинейных 3D-инверсий с использованием точных (без упрощений) моделей геоэлектромагнитного поля.

Немаловажным является и тот факт, что в подавляющем большинстве работ, посвященных многомерным инверсиям, рассматриваются задачи, в которых электромагнитное поле возбуждается гармоническим током, – это задачи аэроэлектроразведки, магнитотеллурики, индукционного каротажа. И довольно мало публикуется работ, посвященных методам выполнения трехмерных инверсий во временной области, в то время как соответствующие технологии электроразведки в большинстве поисковых задач обладают гораздо большей разрешающей способностью и имеют гораздо более широкий спектр применения (это относится к нефтепоисковым работам, проводящимся, например, в Восточной Сибири, к поискам рудных месторождений и т.д.).

Основной научной проблемой, решению которой посвящена данная диссертационная работа, является проблема разработки методов выполнения 3D-инверсий данных электромагнитных зондирований и реализующего их программного обеспечения, которые будут обладать достаточной вычислительной эффективностью и могут быть использованы для интерпретации практических данных.

Цели и задачи исследования

Основной целью исследования является разработка процедур выполнения автоматических 3D-инверсий на основе комбинированных методов расчета трехмерных электромагнитных полей с использованием борновских приближений и конечноэлементных аппроксимаций. Для достижения этой цели были решены следующие задачи.

1. Разработаны методы быстрого приближенного расчета полей влияния отдельных 3D-объектов в средах, содержащих множество трехмерных объектов, для технологий зондирования становлением поля.

2. Разработаны методы решения трехмерных обратных задач геоэлектрики с

минимизацией функционала невязки вдоль направлений, получаемых с помощью борновских приближений.

3. Разработан метод регуляризации обратной трехмерной задачи с выделением подобластей сглаживания коэффициента удельной проводимости.

Научная новизна

1. Предложена новая процедура восстановления трехмерной удельной проводимости среды по данным становления поля, использующая минимизацию функционала невязки вдоль направлений, получаемых из борновских приближений, и сглаживание удельной проводимости по подобластям.

2. Разработан новый метод регуляризации для решения обратной трехмерной задачи геоэлектрики со сглаживанием удельной проводимости по подобластям.

3. Впервые были выполнены автоматические 3D-инверсии на основе комбинированных методов расчета трехмерных нестационарных электромагнитных полей с использованием борновских приближений и конечноэлементных аппроксимаций.

На защиту выносятся:

1. Методы быстрого расчета с совместным использованием борновских приближений и конечноэлементных аппроксимаций полей влияния отдельных 3D-ячеек при наличии в среде других трехмерных объектов для технологии зондирования становлением поля.

2. Методы решения трехмерных обратных задач геоэлектрики с индукционным источником, основанные на минимизации функционала невязки вдоль направлений, получаемых с помощью борновских приближений.

3. Метод регуляризации обратной трехмерной задачи, базирующийся на сглаживании удельной проводимости по отдельным подобластям.

4. Результаты применения разработанных методов выполнения автоматических 3D-инверсий и реализующего их программного комплекса для интерпрета-

ции данных, полученных при использовании технологии зондирования становлением поля.

Достоверность результатов

Процедуры быстрого расчета на основе борновского приближения полей влияния отдельных 3D-объектов протестированы путем сравнения с конечноэлементным расчетом для распределенного по объекту источника поля. Разработанные процедуры 3D-инверсии протестированы на синтетических данных, полученных с использованием 3D-моделирования нестационарных геоэлектромагнитных полей.

Практическая значимость работы и реализация результатов

Разработанные методы и программы применялись для обработки практических данных, полученных на площадях Восточной Сибири с использованием технологии зондирования становлением поля.

Личный вклад

Лично автором разработаны и программно реализованы методы выполнения 3D-инверсии данных на основе борновских приближений. Проведены исследования работоспособности разработанного программно-математического обеспечения с использованием синтетических аналогов полевых данных, полученных в результате 3D-моделирования электромагнитных полей для геоэлектрических моделей нефтяных месторождений различной сложности.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены и докладывались на X и XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2010, АПЭП-2012 (Новосибирск, 2010, 2012); всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2009, 2010); российской научно-технической конференции «Информатика и проблемы телекоммуникаций» (Новосибирск, 2009, 2010); уральской моло-

дежной научной школе по геофизике (Екатеринбург, 2010); 10-м Международном геофизическом научно-практическом семинаре «Применение современных электроразведочных технологий при поисках месторождений полезных ископаемых» (Санкт-Петербург, 2012); VI Всероссийской школе-семинаре по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна ЭМЗ-2013 (Новосибирск, 2013); Международном симпозиуме 5th International symposium on Three-Dimensional Electromagnetics (Sapporo, Japan, May 7 – 9, 2013).

Работа выполнялась в рамках государственных заданий высшим учебным заведениям в части проведения НИР (шифр заявки 8.874.2011) и гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (№ гранта МД-1925.2011.5).

Публикации

По результатам выполненных исследований опубликовано 15 работ, из них 4 статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых ВАК, 9 работ в сборниках трудов конференций и 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ в ФИПС Роспатент.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованных источников (130 наименований). Общий объем диссертации – 144 страницы, в том числе 104 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава диссертационной работы посвящена конечноэлементным схемам моделирования нестационарных электромагнитных полей вызванных токовой петлей или электрическим диполем. В ней приведены математические модели, эквивалентные вариационные постановки и дискретные аналоги.

Электромагнитное нестационарное поле в однородной по магнитной прони-

цаемости среде, вызванное круговой генераторной петлей с током, находящейся в плоскости $z = \text{const}$, может быть полностью описано решением следующей начально-краевой задачи:

$$\frac{1}{\mu_0} \text{rot}(\text{rot } \vec{A}) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{J}^{\text{ст}}, \text{ в } \Omega, \vec{A}|_{\Gamma} = 0, \quad (1)$$

где σ – электрическая проводимость, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\vec{J}^{\text{ст}}$ – плотность стороннего тока (определяемая током в генераторной петле), Γ – граница расчетной области Ω . В качестве начального условия $\vec{A}|_{t=t_0}$ берется решение стационарной задачи

$$\frac{1}{\mu_0} \text{rot}(\text{rot } \vec{A}) = \vec{J}^{\text{ст}}, \text{ в } \Omega, \vec{A}|_{\Gamma} = 0, \quad (2)$$

если в качестве источника задана функция Хевисайда (на практике это означает достаточно длинный импульс, то есть такой, что к моменту выключения тока в генераторной петле электромагнитное поле уже полностью установилось).

При использовании технологии разделения поля на нормальную и аномальную составляющие вектор \vec{A} представляется в виде суммы: $\vec{A} = \vec{A}^0 + \vec{A}^a$. При численном моделировании геоэлектромагнитных полей в качестве нормального поля используется поле источника в горизонтально-слоистой среде (Ю.Г. Соловейчик), которое можно получить через решение двумерной задачи меньшей размерности. Для нахождения поля влияния трехмерных неоднородностей необходимо решать трехмерное векторное уравнение

$$\frac{1}{\mu_0} \text{rot}(\text{rot } \vec{A}^a) + \sigma \frac{\partial \vec{A}^a}{\partial t} = (\sigma - \sigma^0) \vec{E}^0, \text{ в } \Omega, \vec{A}^a|_{\Gamma} = 0, \quad (3)$$

где $\vec{E}^0 = -\frac{\partial \vec{A}^0}{\partial t}$, $\vec{A}^a|_{t=t_0} = 0$.

В соответствии с методом интегральных уравнений, решение уравнения (3) в любой точке пространства может быть получено как значение реакции

горизонтально-слоистой среды в этой точке на поле, возникающее в аномалии.

Интегральное представление для вектора \vec{A}^a будет иметь вид

$$\vec{A}^a(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^t \int_{\Omega} \mathbf{G}(x, y, z, x', y', z', t - \tau) (\sigma^0 - \sigma) \frac{\partial \vec{E}}{\partial \tau}(x', y', z', \tau) dx' dy' dz' d\tau, \quad (4)$$

где $\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ – напряженность электрического поля, а $\mathbf{G}(x, y, z, x', y', z', t - \tau)$ – тензор Грина, компоненты которого определяются как реакция электромагнитного поля (в виде значений вектор-потенциала \vec{A}^0) горизонтально-слоистой среды с удельной проводимостью σ^0 в момент времени τ в точке с координатами (x, y, z) на соответствующим образом сориентированный точечный источник (электрический диполь), расположенный в точке (x', y', z') , действовавший бесконечно долго до момента времени $t = 0$ и выключенный в этот момент ($t = 0$).

Заменим в соотношении (4) стоящее под интегралом поле \vec{E} на поле \vec{E}^n среды с проводимостью σ^n , в результате получим линеаризованное поле

$$\begin{aligned} \tilde{A}^a(x, y, z, t) = \\ = \int_{-\infty}^t \int_{\bigcup_m \Omega_m} \mathbf{G}(x, y, z, x', y', z', t - \tau) (\sigma^n - \sigma_m) \frac{\partial \vec{E}^n}{\partial \tau}(x', y', z', \tau) dx' dy' dz' d\tau, \quad (5) \end{aligned}$$

где Ω_m – подобласти, в которых проводимость σ , равная σ_m , отличается от проводимости σ^n среды, полученной на n -ой итерации процедуры восстановления проводимости изучаемой трехмерной среды. Поле \vec{E}^n может быть найдено из решения соответствующей начально-краевой задачи, аналогичной задаче для уравнения (3).

Нестационарное электромагнитное поле, вызванное горизонтальным электрическим диполем, согласно подходу, предложенному в работах В.С. Могилатова, описывается уравнениями

$$-\frac{\partial^2 X}{\partial z^2} + \lambda^2 X + \mu \sigma \frac{\partial X}{\partial t} = 0, \quad (6)$$

$$-\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial V}{\partial z} \right) + \lambda^2 \frac{V}{\sigma} + \mu \frac{\partial V}{\partial t} = 0, \quad (7)$$

с условиями

$$[\mu X] \Big|_{z=z_i} = 0, \quad [X'_z] \Big|_{z=z_i} = \begin{cases} -2\lambda q(t), & i=1, \\ 0, & i \neq 1, \end{cases} \quad X \rightarrow 0, \\ [V] \Big|_{z=z_i} = \begin{cases} -2q(t), & i=1, \\ 0, & i \neq 1, \end{cases} \quad [V'_z/\sigma] \Big|_{z=z_i} = 0, \quad V \rightarrow 0, \quad |z| \rightarrow \infty,$$

где z_i – координаты, соответствующие границам слоев, z_1 – координата, соответствующая положению источника.

Компонента электромагнитного поля H_z рассчитывается через функцию X

$$H_z = Idx_0 \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{4\pi} \int_0^\infty J_0(\lambda r) X(\lambda) d\lambda \right], \quad (8)$$

где $J_0(\lambda r)$ – функции Бесселя.

Во **второй главе** диссертационной работы рассматривается процедура решения трехмерной обратной задачи, в том числе метод построения и решения линейризованной обратной задачи на основе борновских приближений. Программа, реализующая 3D-инверсию данных на основе борновских приближений, полученных по технологии зондирования становлением поля, основана на следующей вычислительной схеме. Будем считать, что для нескольких (P) положений генераторной установки (источника поля) получены сигналы $\varepsilon(t)$ в $v_1 + v_2 + \dots + v_P = L$ приемниках (т.е. для p -го положения источника сигналы $\varepsilon(t)$ регистрировались в v_p приемниках, $p=1, \dots, P$). Обозначим через ε_{lk} аномальные сигналы ЭДС, зарегистрированные в l -м приемнике в момент времени t_k ($l=1 \dots L, k=1 \dots K$). Если для двух положений источника используется одно и то же положение приемника, то будем считать, что это разные приемники (т.е. они имеют разные номера l). Аномальные теоретические сигналы, полученные в

результате решения линейризованной прямой задачи с использованием борновского приближения, обозначим через $\tilde{\varepsilon}_{lk}$.

Исследуемая часть среды разбивается на элементарные подобласти Ω_m , $m=1..M$, в каждой из которых будут истраться свои значения $\Delta\sigma_m = \sigma_m - \sigma_m^n$ (где σ_m^n проводимость референтной среды, относительно которой вычисляются аномальные сигналы $\tilde{\varepsilon}_{lk}$).

Значения $\tilde{\varepsilon}_{lk}$, как уже говорилось, ищутся в результате решения линейризованной прямой задачи в виде:

$$\tilde{\varepsilon}_{lk} = \sum_{m=1}^M \Delta\sigma_m \tilde{\varepsilon}_{lk}^m, \quad (9)$$

где $\tilde{\varepsilon}_{lk}^m$ – значения ЭДС поля, рассчитываемого в референтной среде и порождаемого источниками в виде единичных электрических диполей, заданных в подобластях Ω_m с аномальной проводимостью σ_m .

Значения $\Delta\sigma_m$ ищутся в результате минимизации функционала

$$\begin{aligned} \Phi^\alpha(\Delta\sigma_m) = & \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K \left(\omega_{lk} \left(\sum_{m=1}^M (\Delta\sigma_m \tilde{\varepsilon}_{lk}^m) - \varepsilon_{lk} \right) \right)^2 + \\ & + \sum_{m=1}^M \alpha_m (\Delta\sigma_m)^2 + \sum_{m=1}^M \gamma_m \sum_{s \in I_m} \left(\sigma_m^n + \Delta\sigma_m - \sigma_s^n - \Delta\sigma_s \right)^2, \end{aligned} \quad (10)$$

где ω_{lk} – некоторые веса, α_m и γ_m – параметры регуляризации, а I_m – множество номеров ячеек, окружающих m -ю ячейку и входящую в ту же подобласть сглаживания. В качестве ω_{lk} используются величины, обратные к значениям ЭДС горизонтально-слоистой вмещающей среды. Значения параметров регуляризации α_m выбираются максимальными, при которых значение функционала увеличивается не более, чем на 1 %, а также такими, чтобы найденные значения $\Delta\sigma_m$ соответствовали положительным значениям σ_m . Параметры γ_m определяются необходимым уровнем гладкости получаемого распределения проводимости σ .

Фактически задача минимизации (10) сводится к решению СЛАУ

$$\mathbf{A}\Delta\sigma = \mathbf{f} \quad (11)$$

для вектора $\Delta\sigma = (\Delta\sigma_1, \dots, \Delta\sigma_m)^T$ аномальных проводимостей.

Элементы матрицы \mathbf{A} и вектора \mathbf{f} в (11) вычисляются по следующим формулам

$$A_{ij} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (\omega_{lk})^2 \tilde{\varepsilon}_{lk}^i \tilde{\varepsilon}_{lk}^j - \lambda_{ij} (\gamma_i + \gamma_j), \quad i \neq j, \quad \lambda_{ij} = \begin{cases} 1, & j \in I_i, \\ 0, & j \notin I_i, \end{cases} \quad (12)$$

$$A_{ii} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (\omega_{lk})^2 \tilde{\varepsilon}_{lk}^i \tilde{\varepsilon}_{lk}^j + \alpha_i + \sum_{s \in I_i} (\gamma_i + \gamma_s), \quad (13)$$

$$f_i = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^K (\omega_{lk})^2 \varepsilon_{lk} \tilde{\varepsilon}_{lk}^i + \sum_{s \in I_i} (\gamma_i + \gamma_s) (\sigma_s^n - \sigma_i^n), \quad i, j = 1 \dots M. \quad (14)$$

При расчете $\tilde{\varepsilon}_{lk}^m$ мощность горизонтальных электрических диполей, помещенных в центр подобласти Ω_m (с аномальной проводимостью σ_m) задается равной

$$q_m(t) = \int_{\Omega_m} \sqrt{(E_x^n)^2 + (E_y^n)^2} d\Omega. \quad (15)$$

По решению линеаризованной задачи определяются направления, вычисляется новое приближение значений удельной проводимости и рассчитывается функционал невязки нелинейной обратной задачи путем конечноэлементного решения прямой задачи для уравнения, аналогичного (3). На следующей итерации при поиске очередного направления в качестве E_x^n и E_y^n берутся значения напряженности электрического поля, полученные при решении трехмерной задачи для распределения удельной проводимости σ^n с предыдущей итерации.

По окончании итерационного процесса на основе полученного распределения параметров удельного сопротивления выделяются подобласти ячеек, предположительно соответствующие локальным трехмерным неоднородностям. После этого процесс может быть продолжен с использованием специальной процедуры сглаживания, основанной на близости значений удельного сопротивления внутри

выделенных подобластей, путем выбора подходящих значений γ_m в функционале (10).

Верификация разработанных методов автоматических 3D-инверсий выполнялась с использованием различных геоэлектрических моделей, для которых с помощью 3D-моделирования были синтезированы аналоги полевых данных. В качестве одного из примеров была рассмотрена геоэлектрическая модель, представляющая собой пятислойную вмещающую среду с параметрами $h_1 = 230$ м, $\rho_1 = 70$ Ом·м, $h_2 = 270$ м, $\rho_2 = 15$ Ом·м, $h_3 = 440$ м, $\rho_3 = 7$ Ом·м, $h_4 = 460$ м, $\rho_4 = 3$ Ом·м, $\rho_5 = 300$ Ом·м (h_i – толщина i -го слоя, ρ_i – его удельное сопротивление), в которую на разные глубины помещено 3 объекта. Эта модель приведена на рисунке 1, где также показана квадратная генераторная петля размером 1×1 км², соответствующие приведенному положению генераторной петли приемники (обозначены точками) и траектория перемещения приемно-генераторной установки по трем профилям (на каждом из профилей по четыре положения приемно-генераторной установки).

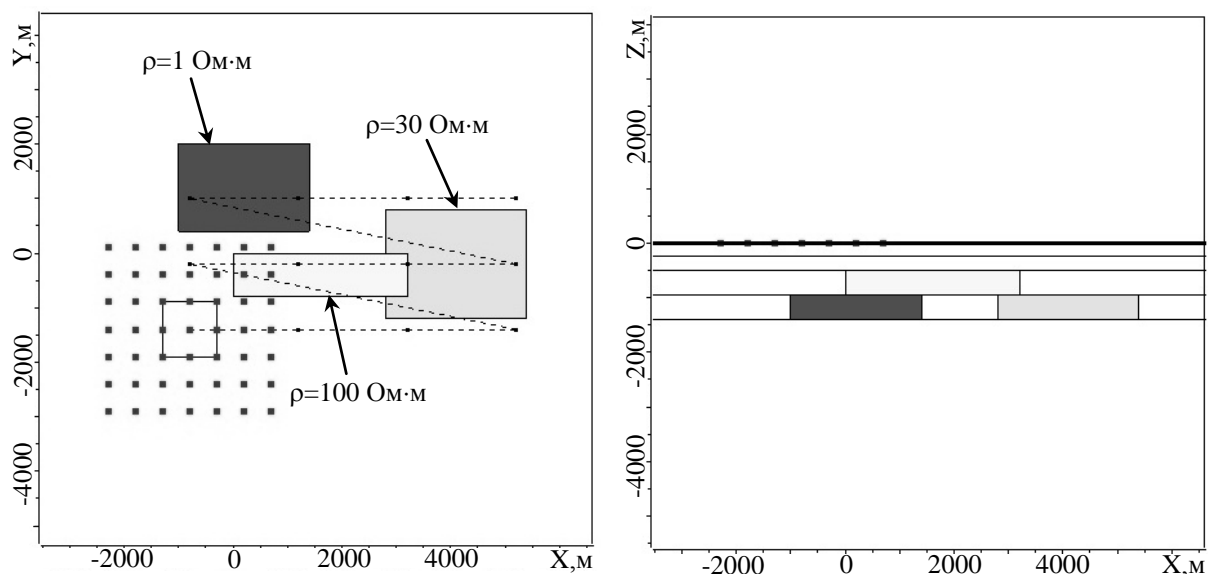


Рисунок 1 – Истинная геоэлектрическая модель

В результате работы процедуры нелинейной 3D-инверсии в двух слоях ячеек было восстановлено удельное электрическое сопротивление, показанное на рисунке 2. Всего было сделано 6 итераций, что обеспечило понижение функционала невязки от 0.09 до 0.0066. При этом значения γ_m в функционале (10) принимались равными нулю. Черной пунктирной линией здесь и далее будут обозначены контуры реальных объектов, расположенных в соответствующих слоях.

По полученному распределению удельного электрического сопротивления были выделены подобласти, предположительно соответствующие местоположению трехмерных объектов, и процесс 3D-инверсии был продолжен, но уже с использованием специальной процедуры сглаживания, обеспечивающей близость значений удельного сопротивления в ячейках, находящихся внутри каждой из выделенных подобластей (т.е. при $\gamma_m \neq 0$, и при этом соседними считались только ячейки, принадлежащие одной подобласти).

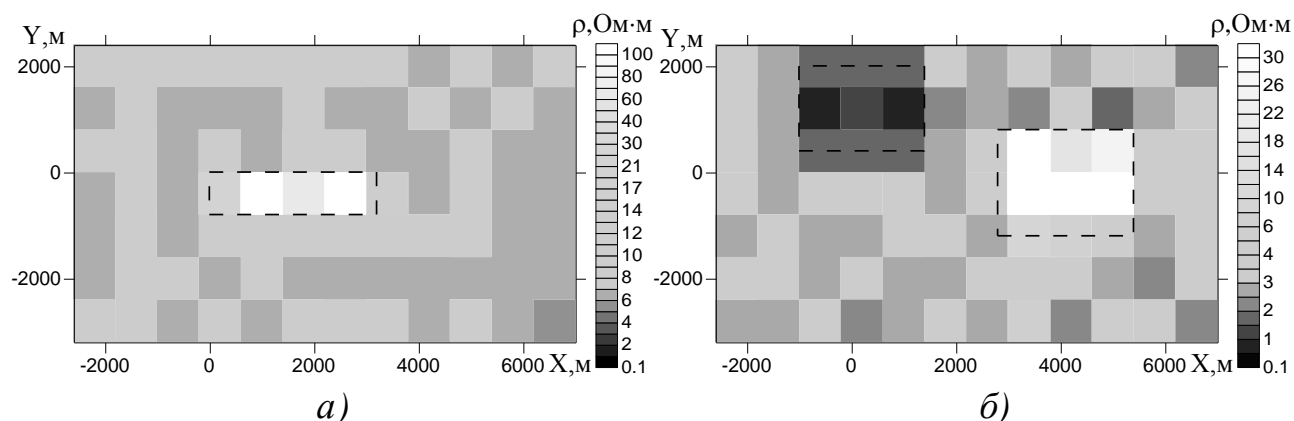


Рисунок 2 – Распределение удельного электрического сопротивления в слое ячеек от 500 до 940 м (а) и в слое ячеек от 940 до 1400 м (б)

На рисунке 3 приведено распределение удельного электрического сопротивления, полученное с использованием специальной процедуры сглаживания. Из приведенных на рисунке 3 результатов видно, что полученное распределение удельного электрического сопротивления достаточно хорошо соответствует истинной модели.

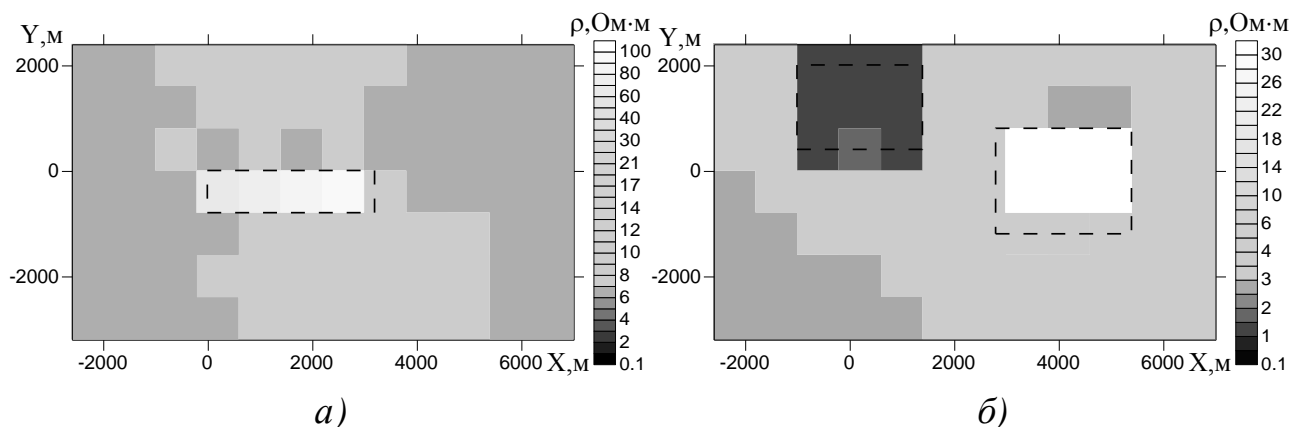


Рисунок 3 – Распределение удельного электрического сопротивления в слое ячеек от 500 до 940 м (а) и в слое ячеек от 940 до 1400 м (б), полученные после применения специальной процедуры сглаживания

Третья глава диссертационной работы посвящена применению разработанных методов выполнения 3D-инверсий для интерпретации данных, полученных по технологии зондирования становлением поля. Приведены основные этапы технологии 3D-инверсии и примеры ее использования.

В качестве примера рассмотрим геоэлектрическую модель, показанную на рисунке 4. Эта геоэлектрическая модель, представляющая собой шестислойную вмещающую среду с параметрами $h_1 = 300$ м, $\rho_1 = 300$ Ом·м, $h_2 = 200$ м, $\rho_2 = 5$ Ом·м, $h_3 = 1700$ м, $\rho_3 = 170$ Ом·м, $h_4 = 100$ м, $\rho_4 = 10$ Ом·м, $h_5 = 500$ м, $\rho_5 = 500$ Ом·м, $\rho_6 = 5000$ Ом·м, в верхнюю часть которой помещено 5 объектов (имитирующих геологические объекты-помехи, с удельными сопротивлениями от 3 до 10 Ом·м), а в нижнюю часть – целевой объект с удельным сопротивлением 2 Ом·м.

На первом этапе интерпретации данных по комплексу всех данных была подобрана некоторая средняя вмещающая среда с параметрами $h_1 = 300$ м, $\rho_1 = 300$ Ом·м, $h_2 = 200$ м, $\rho_2 = 5.13$ Ом·м, $h_3 = 200$ м, $\rho_3 = 75$ Ом·м, $h_4 = 2850$ м, $\rho_4 = 200$ Ом·м, $\rho_5 = 840$ Ом·м.

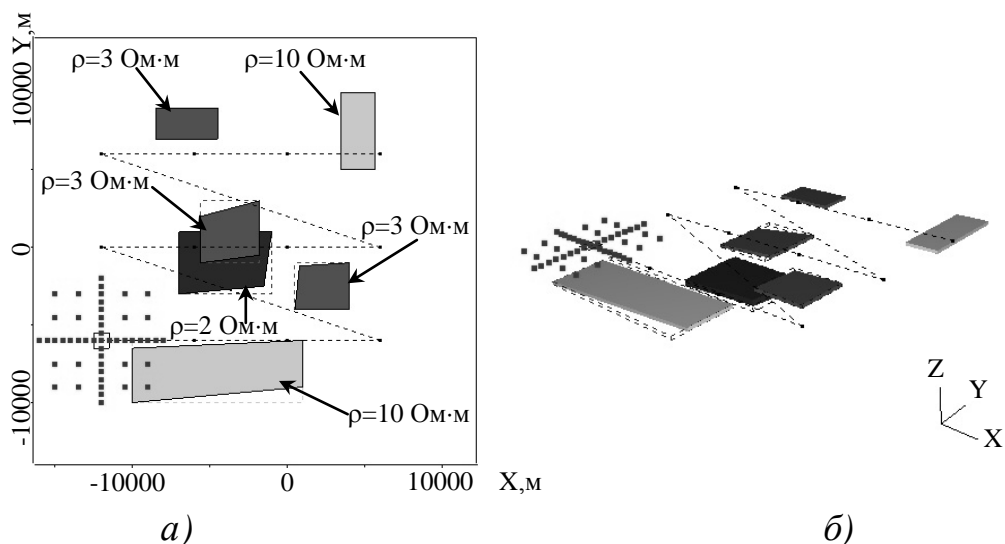


Рисунок 4 – Геоэлектрическая модель, содержащая приповерхностные объекты-помехи и глубокий целевой объект: план (а), объемное изображение (б)

На втором этапе в ячеистой структуре, построенной на уровне верхнего слоя, с использованием разработанной процедуры 3D-инверсии было подобрано удельное электрическое сопротивление. При выполнении 3D-инверсии было сделано 3 итерации, что позволило понизить функционал невязки со значения 0.16 до 0.065. Соответствующее распределение удельного сопротивления показано на рисунке 5а. На рисунке 5б показано распределение удельного сопротивления после использования процедуры сглаживания проводимости по подобластям.

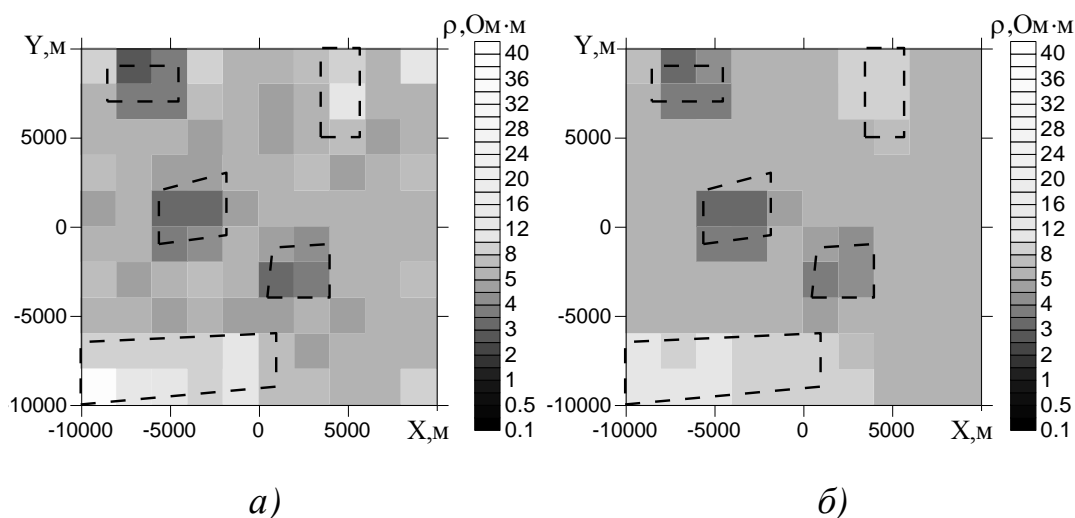


Рисунок 5 – Распределение удельного электрического сопротивления в верхнем слое после трех итераций до использования процедуры сглаживания (а) и после использования процедуры сглаживания в выделенных подобластях (б)

На следующем этапе подобранные значения удельного электрического сопротивления в ячейках в верхних слоях были зафиксированы, и был осуществлен подбор удельного сопротивления в ячейках, расположенных на глубине.

На рисунке 6 приведено распределение удельного электрического сопротивления в нижнем слое до и после использования процедуры сглаживания в выделенных подобластях.

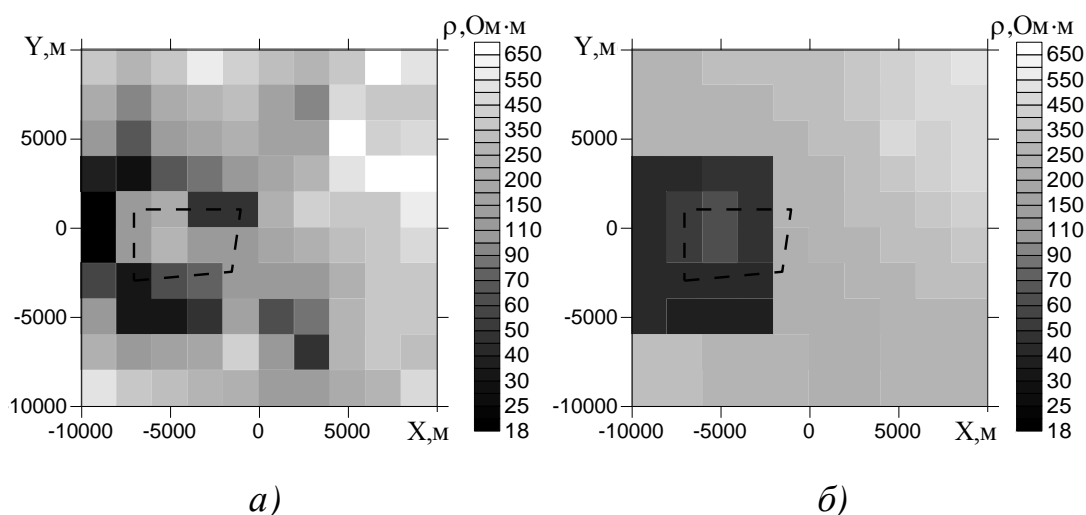


Рисунок 6 – Распределение удельного электрического сопротивления в глубинном слое до использования процедуры сглаживания (*а*) и после использования процедуры сглаживания в выделенных подобластях (*б*)

Для дальнейшего улучшения подбора параметров глубинного объекта требуется выполнение полной нелинейной 3D-инверсии – процедуры, где направления также ищутся с использованием точного 3D-моделирования, а не на основе борновских приближений.

Тем не менее, разработанная процедура, основанная на борновской инверсии, может дать правильные «подсказки» пользователю для задания стартовой модели в полной нелинейной инверсии – показать места «дефицита» и «избытка» проводимости.

Например, для выбранного в результате описанной выше процедуры 3D-инверсии распределения удельного сопротивления, можно оценить избыточную (или недостаточную) проводимость следующим образом. В качестве предварительного распределения удельного сопротивления в слое очевидным образом (пу-

тем осреднения удельного сопротивления внутри выделенной подобласти) можно задать распределение, показанное на рисунке 7а. В результате одного шага борновской инверсии со сглаживанием было получено распределение удельного электрического сопротивления, показанное на рисунке 7б. Соответствующее ему распределение аномальной проводимости приведено на рисунке 7в.

Из приведенных на рисунке 7 результатов видно, что предполагаемый объект находится на том месте, на котором он задан, однако его удельное электрическое сопротивление должно быть ниже, что соответствует истинной геоэлектрической модели.

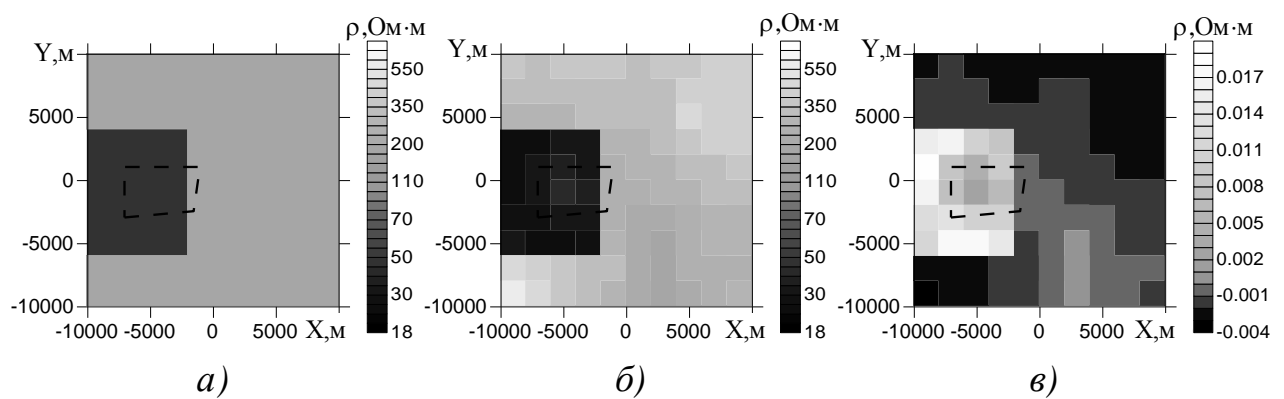


Рисунок 7 – Восстановление избыточной проводимости при примерном совпадении положений истинного и аппроксимирующего его объектов:

а – предварительное распределение удельного сопротивления в слое;

б – удельное сопротивление, полученное в результате одного шага борновской инверсии со сглаживанием в выделенных подобластях;

в – распределение аномальной проводимости

Рассмотрим теперь ситуацию, когда начальное расположение объекта не совпадает с истинным. Эта ситуация приведена на рисунке 8а. На рисунке 8б приведено распределение удельного электрического сопротивления, полученное в результате одного шага борновской инверсии, а на рисунке 8в – соответствующее ему распределение аномальной проводимости.

Из приведенного на рисунке 8в распределения аномальной проводимости с очевидностью следует, что объект в стартовой модели должен быть смещен к ле-

вому краю расчетной области (что также соответствует местоположению объекта в истинной модели).

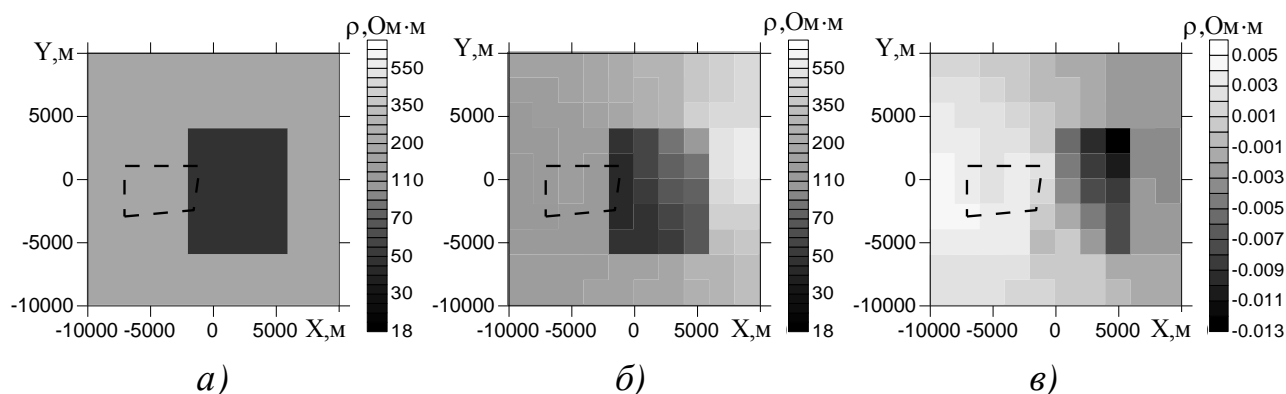


Рисунок 8 – Восстановление избыточной проводимости при несовпадении положений истинного и аппроксимирующего его объектов:

a – предварительное распределение удельного сопротивления в слое;

б – удельное сопротивление, полученное в результате одного шага борновской инверсии со сглаживанием в выделенных подобластях;

в – распределение аномальной проводимости

В **четвертой главе** диссертационной работы описаны основные реализованные модули и подсистемы программного комплекса выполнения автоматических 3D-инверсий.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты проведенных в диссертационной работе исследований состоят в следующем.

1. Разработаны методы быстрого расчета на основе борновского приближения полей влияния отдельных 3D-объектов в средах с множеством трехмерных объектов для технологии зондирования становлением поля.

2. Разработаны методы решения трехмерных обратных задач геоэлектрики с индукционным источником, основанные на минимизации функционала невязки вдоль направлений, получаемых с помощью борновских приближений. С использованием синтетических данных, полученных с помощью 3D-моделирования нестационарных геоэлектромагнитных полей для геоэлектрических моделей различной сложности, показана их работоспособность.

3. Разработан метод регуляризации обратной трехмерной задачи, базирующийся на сглаживании удельной проводимости по отдельным подобластям. Показано, что его применение на заключительных этапах инверсии существенно повышает качество восстановленной геоэлектрической модели.

4. Разработанные методы реализованы в программном комплексе, позволяющем достаточно уверенно выделять приповерхностные объекты в горизонтально-слоистой среде и определять места дефицита и избытка проводимости относительно среды с уже выделенными 3D-объектами в технологиях зондирования с источником в виде токовой петли.

5. Разработанный программный комплекс выполнения автоматических 3D-инверсий применялся для интерпретации данных, полученных при использовании технологии зондирования становлением поля.

Основные публикации автора по теме диссертации

Журналы из Перечня ВАК ведущих рецензируемых научных изданий для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук:

1. Персова, М.Г. Возможности многокомпонентной съемки для уменьшения зон эквивалентности при электромагнитных зондированиях / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, И.Е. Аврунева, **Е.И. Симон** // Доклады АН ВШ РФ. – 2010. – № 2(15). – С.101–110.

2. Персова, М.Г. Оценка возможностей электромагнитных технологий при решении мониторинговых задач на основе 3D-моделирования / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, **Е.И. Симон** // Доклады АН ВШ РФ. – 2010. – № 2(15). – С.111–120.

3. Персова, М.Г. 3D-инверсия данных вызванной поляризации на основе конечно-элементного моделирования / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Токарева, **Е.И. Симон**, М.В. Абрамов, У.А. Сафронова // Научный вестник НГТУ. – 2012. – №3(48). – С.25–34.

4. Персова, М.Г. Алгоритмы 3D-инверсии данных зондирований становлением поля с использованием борновских приближений / М.Г. Персова, **Е.И. Симон**, Ю.Г. Соловейчик, Ю.И. Кошкина // Научный вестник НГТУ. – 2013. – №2(51). – С.62–72.

Материалы конференций:

5. **Симон, Е.И.** Решение гармонических трехмерных задач электромагнитного каротажа с использованием шестигранных конечных элементов с криволинейными границами / **Е.И. Симон** // Информатика и проблемы телекоммуникаций: материалы рос. науч.-технич. конф. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2009. – Т.1. – С.61–64.

6. **Симон, Е.И.** Конечноэлементное моделирование трехмерных гармонических полей в областях с криволинейными границами / **Е.И. Симон** // Наука. Технологии. Инновации. НТИ–2009: материалы всерос. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – Т.1. – С.140–142.

7. **Симон, Е.И.** Возможности использования многокомпонентного приема поля для снижения зон эквивалентности при профильных измерениях ЗСБ / **Е.И. Симон** // XI Уральская молодежная научная школа по геофизике. Сборник докладов. – Екатеринбург : ИГфУрО РАН, 2010. – С.210–213.

8. **Симон, Е.И.** Анализ эффективности использования шестигранных конечных элементов с изогнутыми границами при моделировании электромагнитных полей в задачах индукционного электрокаротажа / **Е.И. Симон** // Информатика и проблемы телекоммуникаций: материалы рос. науч.-технич. конф. – Новосибирск: Изд-во СибГУТИ, 2010. – Т.1. – С.93–97.

9. Персова, М.Г. Компьютерное моделирование трехмерных геоэлектромагнитных полей, возбуждаемых контролируемыми источниками, в средах с анизотропной проводимостью / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, П.А. Домников, **Е.И. Симон** // Материалы X международной конференции «Актуальные пробле-

мы электронного приборостроения» АПЭП–2010. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – Т.6. – С.134–138.

10. Персова, М.Г. О томографическом подходе к интерпретации данных электромагнитных зондирований в трехмерных средах / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, П.А. Домников, **Е.И. Симон** // Материалы X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП–2010. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – Т.6. – С.150–155.

11. **Симон, Е.И.** О подходе к построению стартовой модели для интерпретации данных / **Е.И. Симон**, И.Е. Аврунева // Наука. Технологии. Инновации. НТИ–2010 : материалы всерос. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – Т.1. – С.96–98.

12. Персова, М.Г. 3D-инверсия данных зондирований становлением поля на основе борновских приближений / М.Г. Персова, **Е.И. Симон**, У.А. Сафронова // Материалы XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП–2012. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – Т.6. – С.108-113.

13. Персова, М.Г. О сравнении двух подходов к 3D-инверсии данных электромагнитных зондирований во временной области [Электронный ресурс] / М.Г.Персова, Ю.Г.Соловейчик, Д.В.Вагин, **Е.И.Симон**, Т.Г.Шашкова // Материалы VI Всероссийской школы-семинара по электромагнитным зондированиям Земли имени М.Н. Бердичевского и Л.Л. Ваньяна (ЭМЗ-2013). –Новосибирск: ИНГГ СО РАН, 2013. – Режим доступа: <http://ems2013.ipgg.sbras.ru>.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

14. Соловейчик, Ю.Г. INVERS-IP – прикладное ПО для выполнения 3D-инверсий данных электроразведки, полученных методом вызванной поляризации / Ю.Г. Соловейчик, М.Г. Персова, М.В. Абрамов, Д.В. Вагин, П.А. Домников, **Е.И. Симон** // Свидетельство о государственной регистрации программы для

ЭВМ № 20122618321 от 14.09.2012. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2012.

15. Персова, М.Г. СИТЕМ-3D – 3D-инверсии данных технологии ТЕМ с использованием ячеистых структур (Cell-Inversion-of-Transient-ElectroMagnetic-data – 3Dimensional) / М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик, **Е.И. Симон**, Ю.И. Кошкина // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013612529 от 28.02.2013. – М.: Федеральная служба по интеллектуальной собственности (Роспатент). – 2013.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
формат 60 X 84/16 объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.
Заказ подписано в печать 2014 г.